# ASPECTE GENERALE CU PRIVIRE LA ANALIZA PROPRIETĂŢILOR MECANICE ALE MATERIALELOR

Există deosebiri foarte pronunţate în privinţa modului în care se comportă diversele categorii de materiale, atunci când sunt solicitate mecanic. Calea cea mai obişnuită pentru punerea lor în evidenţă este efectuarea unor teste de laborator numite încercări mecanice. Ca principiu, acestea constau în aplicarea unor încărcări exterioare, adecvate solicitării realizate, asupra unor eşantioane din materialul de studiat, numite epruvete, având forme şi dimensiuni specifice fiecărui experiment.

Încercările mecanice sunt foarte variate, în primul rând deoarece solicitările care trebuie materializate sunt foarte diverse, dar şi pentru că pot fi realizate în condiţii statice sau dinamice, la temperatura mediului, sau la temperaturi ridicate ori joase, în aer sau în medii corozive s.a.m.d.

Pentru ca rezultatele experimentale obţinute la momente şi în locuri diferite să poată fi comparate între ele, încercările se efectuează în condiţii stabilite prin standarde, elaborate de organizaţiile competente din fiecare ţară: cele mai cunoscute sunt American Society for Testing and Materials - ASTM în SUA, German Standards Bureau - DIN în Germania, Japanese Industrial Standard - JIS în Japonia. În ţara noastră această activitate este coordonată de Institutul Român de Standardizare.

Pe de altă parte, tendinţa actuală de globalizare a efectelor activităţilor umane din cele mai diverse domenii se reflectă şi în privinţa acestor standarde, care pe continentul nostru sunt puse în concordanţă, în mod treptat, sub formă de norme europene unice (desemnate prin apariţia în denumirea standardelor a siglei EN), iar pe plan mondial prin recomandările International Standard Organisation (ISO - siglă care, de asemenea, apare în denumirea standardelor puse de acord cu normele internaţionale).

Trebuie precizat, în această ordine de idei, că în prezent au valabilitate în România patru categorii de standarde:

- cele adoptate înainte de 1989, denumite STAS şi aflate în curs de actualizare, respectiv de înlocuire;
- cele adoptate (respectiv actualizate) după 1990, denumite codificat prin literele SR, urmate de numărul standardului şi de anul ultimei actualizări (scris complet);
- cele puse în acord cu normele internaţionale, ale căror numere de ordine le-au preluat, codificate la fel ca mai sus, dar cu literele SR EN, respectiv SR ISO.

Principial, în cadrul încercărilor mecanice se măsoară nivelul încărcărilor aplicate eşantionului din materialul analizat, dimensiunile acestuia, ca şi efectele produse asupra probei (în general deformaţii, elastice şi/sau plastice), după care se stabilesc, folosind relaţii de calcul potrivite, valorile corespunzătoare ale caracteristicilor mecanice ale materialului.

Nivelul solicitărilor este exprimat de obicei prin mărimea fizică numită tensiune mecanică, calculată ca raport între sarcina (forţa sau momentul) care produce solicitarea şi un parametru geometric (aria sau modulul de rezistenţă) al secţiunii de material care preia solicitarea.

La deformaţiile produse pe probă se poate face referire în mărimi absolute (deplasări sau rotiri), sau relative (lungiri sau lunecări specifice), iar măsurarea lor poate fi făcută cu mijloace obişnuite sau cu dispozitive de precizie (extensometre sau montaje de traductoare tensometrice).

Un indicator important al genului de comportare mecanică a unui material este şi curba lui caracteristică – graficul dependenţei dintre nivelul solicitării aplicate şi cel al deformării epruvetei – care se trasează pe parcursul unora dintre încercările mecanice.

Multe dintre încercări presupun solicitarea epruvetei până în momentul în care materialul cedează (adică este atinsă limita lui de rezistenţă la solicitarea respectivă), iar felul în care se produce ruperea şi aspectul secţiunii de rupere sunt şi ele folosite pentru caracterizarea comportării mecanice a materialului cercetat.

# ÎNCERCAREA LA ÎNCOVOIERE A LEMNULUI

**Prezentare generală**

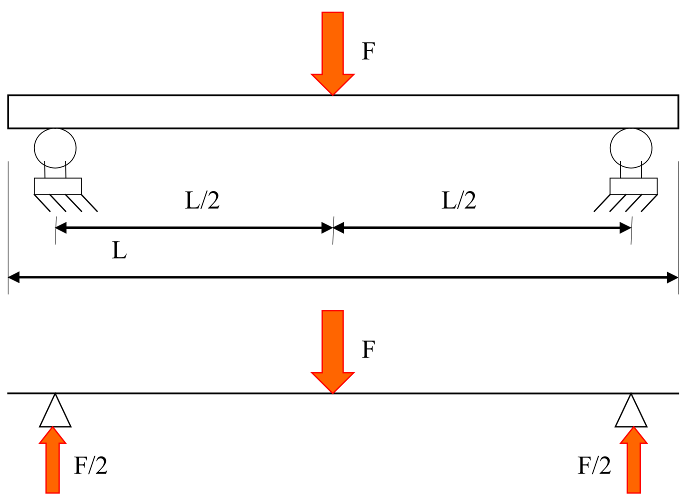
Încovoierea este cea mai complexă dintre solicitările simple, întrucât produce simultan atât deplasări liniare, cât şi rotiri, în jurul axei de îndoire, ale secţiunilor transversale ale barelor. Se realizează prin vectori moment care au direcţie perpendiculară pe axa unei bare şi devine solicitare compusă (încovoiere dublă sau încovoiere cu răsucire) dacă direcţia momentului nu coincide cu una dintre axele principale centrale ale secţiunilor barei.

Pe de altă parte, este o solicitare extrem de prezentă în practica inginerească, întrucât toate barele încărcate cu forţe perpendiculare pe axa lor longitudinală sunt solicitate la încovoiere (şi sunt denumite grinzi). Prin urmare, este important să se stabilească nivelul suportabil al forţelor de pe astfel de bare, ceea ce pentru construcţiile din lemn se analizează pe baza încercărilor de încovoiere pe direcţie perpendiculară pe fibrele lemnului (invers faţă de forfecare).

**Epruveta utilizată**

Se foloseşte o bară prismatică, de lungime totală „$L_0$", având secţiunea transversală de formă dreptunghiulară, cu laturile „b" şi „h", constante ca mărime pe lungimea probei. Aceasta se aşează pe două reazeme simple, aflate la distanţa „L" (reglabilă pe dispozitivul încercării).

**Schema de solicitare**




Pe schiţă se arată realizarea încercării, precum şi modul în care ea se reprezintă simbolic în calculele inginereşti.

Trasarea diagramei de eforturi şi stabilirea tensiunii maxime din secţiunea unde solicitarea este periculoasă nu au fost încă discutate la curs, la momentul efectuării lucrării de laborator, astfel că nu putem intra aici în astfel de detalii. Se poate spune însă, pe baza observaţiilor practice, că o astfel de bară se va rupe întotdeauna în secţiunea din dreptul forţei F, mai precis cu prima fisură producându-se în fibra cea mai de jos a acelei secţiuni transversale a barei.

Ulterior se va demonstra prin calcule că eforturile de tip moment de încovoiere „$M_{iz}(x)$" dintr-o astfel de grindă variază liniar pe lungimea ei (deoarece nu există încărcări de tip forţă distribuită), având valoarea zero în dreptul reazemelor (şi în porţiunile de capăt, lipsite de încărcări) şi crescând (simetric) către punctul de aplicare a forţei, unde ating valoarea FL/4.

Pe de altă parte se va arăta că tensiunile de încovoiere variază liniar şi antisimetric pe înălţimea secţiunilor care sunt simetrice faţă de axa de îndoire, având valoarea zero în punctele de pe această axă (numită şi axa neutră a barei) şi valorile maxime (cu semne opuse) în fibrele extreme ale barei. Acest lucru poate fi intuit cu uşurinţă dacă se observă modul în care se deformează bara sub acţiunea forţei F: pe măsură ce creşte încărcarea, fibrele longitudinale capătă forme tot mai accentuate de arce de cerc, având raze crescătoare către exteriorul curburii. Făcând şi observaţia că dimensiunile transversale ale barei nu suferă modificări semnificative în urma acestei solicitări, deducem că fibrele din jumătatea superioară a barei se scurtează, iar cele din partea de jos se lungesc, deformaţiile fiind proporţionale cu distanţa acestor fibre până la axa de încovoiere.

Din cele de mai sus rezultă (intuitiv) că valorile tensiunilor de încovoiere din fibrele extreme ale barei vor fi (în orice secţiune transversală, inclusiv în cea de rupere) egale şi de semne opuse: dacă solicitările sunt la fel de mari, trebuie explicat motivul pentru care prima fisură apare, pentru o astfel de solicitare, în fibra extremă din partea de jos (opusă punctului de aplicare a forţei).

Aceasta se datorează caracterului fragil al lemnului (mai ales când este uscat) – toate materialele fragile (fonta, piatra, creta, betonul, marmura etc.) suportă bine solicitările de comprimare, dar (prin comparaţie cu acelea) foarte prost pe cele de întindere. Prin urmare, tensiunile din fibrele extreme cresc continuu (la creşterea forţei F), în acelaşi ritm, dar prima dată se egalează limita de rezistenţă la întindere a lemnului, în fibra cea mai de jos.

**Relaţii de calcul**

După cum s-a arătat mai sus, ne limităm la scrierea directă a relaţiei cu care se stabileşte rezistenţa lemnului la încovoiere (perpendicular pe fibrele sale):

$$\sigma_r = \frac{M_{iz\,max}}{W_z} = \frac{F_{max} \cdot L}{4 \cdot \frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max} \cdot L}{b \cdot h^2}$$

unde $F_{max}$ este forţa (în kgf) care rămâne fixată pe cadranul maşinii după ruperea probei, iar $W_z$ este modulul de rezistenţă al secţiunii dreptunghiulare în raport cu axa de încovoiere (relaţia lui de calcul „$bh^2/6$” va fi demonstrată la curs). Este de remarcat că lungimea totală a grinzii nu influenţează acest calcul, în care apare doar distanţa dintre reazeme „L” – despre care s-a arătat că este reglabilă după dorinţa experimentatorului.

**Modul de lucru**

Folosind aceeaşi maşină pentru încercări mecanice, de tip R5, folosită la încercarea de forfecare, vor fi parcurse următoarele etape de lucru:

- se pregăteşte maşina, reglată pentru forţe de compresiune de până la 500kgf;
- se măsoară dimensiunile transversale ale epruvetei, care se aşează în dispozitiv cu dimensiunea mai mare „h” pe direcţie verticală;
- se reglează distanţa dintre reazemele dispozitivului, de exemplu la valoarea L = 200mm;
- se aduce poansonul maşinii în contact cu proba şi se porneşte încărcarea;
- se menţine creşterea forţei F până în momentul în care se produce ruperea epruvetei;
- se scoate proba ruptă din dispozitiv şi se citeşte forţa $F_{max}$ pe cadranul maşinii.

**Analiza rezultatelor**

Prelucrarea datelor experimentale este foarte simplă, fiind de calculat doar rezistenţa lemnului la încovoiere (pe direcţie perpendiculară pe fibre) pe baza relaţiei de mai sus. Desigur, forţa maximă trebuie exprimată în unităţi de măsură din Sistemul Internaţional, adică în Newton (se reaminteşte că 1kgf = 9,81N), pentru ca rezultatul final să fie exprimat în MPa ($N/mm^2$).

Pe lângă stabilirea acestei valori, este important să fie evidenţiate informaţiile furnizate de experimentul efectuat, cu privire la următoarele aspecte ale solicitării de încovoiere:

- deformarea barei, sub acţiunea unei forţe concentrate plasate la mijlocul distanţei dintre cele două reazeme;
- poziţia, pe axele „x” (longitudinală) şi „y” (axa principală centrală perpendiculară pe direcţie de încovoiere), a fibrei în care se produce prima fisură în materialul epruvetei, atunci când încărcarea ajunge la nivelul ei maxim;
- explicarea acestor fenomene, pe baza evoluţiei eforturilor secţionale pe lungimea grinzii, respectiv a tensiunilor de încovoiere pe înălţimea secţiunilor transversale.

În final, trebuie remarcat că rezultatele încercărilor de acest fel sunt importante şi concludente pentru a se realiza încadrarea într-o anumită clasă (inclusiv de aplicaţii recomandabile), a materialului lemnos dintr-un lot de materie primă care s-ar propune a fi cercetat experimental.

# ÎNCERCAREA LA FORFECARE A LEMNULUI

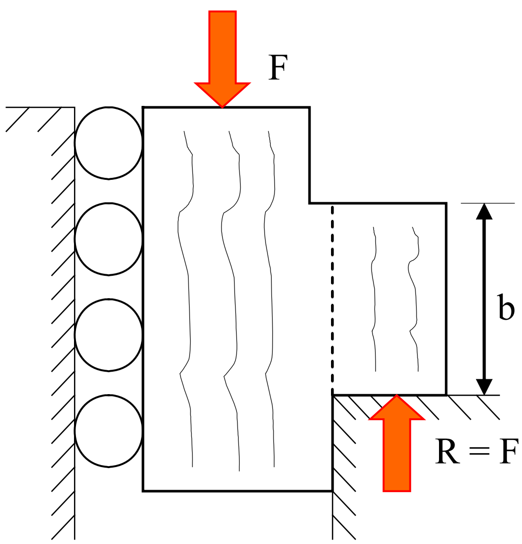
**Prezentare generală**

Lemnul este în mod natural un material cu calităţi particulare, derivate din structura specială, formată din lamele fibroase, care corespund în principiu inelelor de creştere ale copacilor. Acestea vor face ca proprietăţile care sunt stabilite pe probe decupate pe direcţii diferite din masa lemnoasă să aibă valori diferite în mod pronunţat: rezultă că lemnul este un material neomogen şi anizotrop, iar încercările mecanice care i se aplică trebuie să ia în considerare acest lucru.

Atunci când este uscat, lemnul are şi un caracter preponderent fragil, astfel încât rezultatele cele mai grăitoare în privinţa calităţilor lui mecanice se obţin prin încercările de forfecare şi încovoiere; în fiecare caz, încărcările se vor dirija în raport cu fibele lemnului pe direcţii adaptate obiectivelor experimentului respectiv. De exemplu, prin încercarea de forfecare (longitudinală) se urmăreşte să se stabilească la ce nivel al încărcării, pe direcţia fibrelor, se produce ruperea lemnului prin desfacere în straturi.

**Epruveta utilizată**

Se foloseşte o probă de dimensiuni mici (care deci evită risipa de material), având formă prismatică şi două decupări nesimetrice, în zona care este sprijinită, la partea inferioară, în dispozitivul de prindere. Decupările au rolul, aşa cum se va observa pe parcursul experimentului, să predetermine secţiunea pe care se va produce ruperea prin forfecare a epruvetei.




**Schema de solicitare**

După cum se poate observa pe schiţa alăturată, proba de lemn (pe suprafaţa căreia liniile subţiri ondulate evocă direcţia fibrelor) este aşezată cu decuparea mai mică pe reazemul orizontal din partea dreaptă, în vreme ce reazemul vertical din stânga permite alunecarea cu rostogolire a probei către în jos.

Forţa activă F este aplicată de poansonul maşinii de încercat, pe platanul căreia dispozitivul este sprijinit la partea de jos. Reazemul din stânga introduce o forţă de reacţiune R, egală permanent cu F şi crescând împreună cu ea, treptat şi lent.

În momentul în care tensiunea de forfecare egalează şi depăşeşte valoarea rezistenţei lemnului la desfacere în straturi începe să se producă ruperea probei, pe planul indicat cu linie punctată în figură. Dacă fibrele de lemn sunt uniforme în zona de rupere, atunci secţiunea de rupere va fi aproximativ plană, iar dimensiunile ei vor coincide cu înălţimea „b” a epruvetei din partea cu decupări şi respectiv cu grosimea ei „g”.

Este important să se observe două lucruri, în legătură cu forma epruvetei:

- pe de o parte, că pentru a se produce forfecare, iar nu o simplă solicitare de compresiune, este nevoie ca forţele să nu fie pe aceeaşi direcţie, ci să aibă între ele un mic decalaj (care în practică este observabil atât la foarfeci, cât şi la ghilotine, de exemplu);
- în al doilea rând, se poate înţelege că decuparea din dreapta-sus a probei trebuie să fie puţin mai mare (în direcţia paralelă cu reazemul orizontal) decât cea din partea de jos, pentru ca fisura (linia punctată) care se produce la atingerea limitei de rezistenţă (şi care începe de pe muchia, de lungime „g”, aflată în contact cu colţul reazemului de jos) să se poată degaja până la suprafaţa superioară a probei, ajungând să se termine în zona decupării de sus.

Se mai observă că, dacă decuparea de sus ar fi insuficient de mare, fisura s-ar dezvolta către zona superioară a probei, pe care se aplică forţa F, astfel că în epruvetă se va produce nu doar solicitarea de forfecare, ci şi una de compresiune.

În fine, este de remarcat şi faptul că la forfecare solicitarea nu este omogenă (cum este la tracţiune), ci se concentrează într-o anumită secţiune (sau, în alte cazuri, în câteva secţiuni) din probă, iar efectele produse în restul volumului de material pot fi considerate neglijabile.

Nu este lipsită de interes o precizare: încercarea se realizează pe o maşină pentru încercări mecanice de tip R5, de construcţie simplă, necuplată la un calculator. Cadranele pe care se citesc, la această maşină, forţele aplicate epruvetelor sunt gradate în unităţi particulare de măsură, destul de rar folosite în prezent: este vorba despre kilograme-forţă (forţa cu care trage de un resort masa de 1kg), pentru care transformarea în unităţi din SI se face astfel:

$$1\,\text{kgf} = 1\,\text{kg} \times 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9{,}81\,\text{N}$$

Pe baza acestei relaţii se preferă şi se admite ca, în cazul unor calcule aproximative şi grăbite, să se considere că 1kgf = 1 daN, ceea ce însă nu trebuie făcut în calculele de laborator.

**Relaţii de calcul**

Mărimea rezistenţei lemnului la forfecare longitudinală reprezintă valoarea tensiunii de forfecare ce se înregistrează în material în momentul ruperii, în secţiunea de rupere a epruvetei. Prin urmare, această valoare se va calcula ca raport între forţa $F_{max}$ (care rămâne înregistrată pe cadranul maşinii după rupere) şi aria de lemn $A_f$ pe care se produce dislocarea prin forfecare – s-a arătat mai sus că aceasta are forma unui dreptunghi cu laturile „b" şi „g":

$$\tau_r = \frac{F_{max}}{b \cdot g}\ [\text{MPa}]$$

**Modul de lucru**

Efectuarea încercării implică parcurgerea următoarelor etape:

- se măsoară (folosind un şubler) dimensiunile epruvetei de lemn în zona decupată;
- se reglează maşina pentru încercări mecanice pentru forţe cuprinse în intervalul 0-500kgf;
- se montează epruveta în dispozitiv şi se aşează dispozitivul pe platanul maşinii;
- se aduce poansonul maşinii în contact cu partea superioară a probei, pe care se va aplica forţa activă F;
- se porneşte maşina şi se începe creşterea forţelor de forfecare;
- se încarcă proba până la rupere, după care se opreşte maşina şi se extrage epruveta din dispozitiv;
- se reţine valoarea $F_{max}$ a forţei la care s-a produs ruperea epruvetei prin forfecare.

**Analiza rezultatelor**

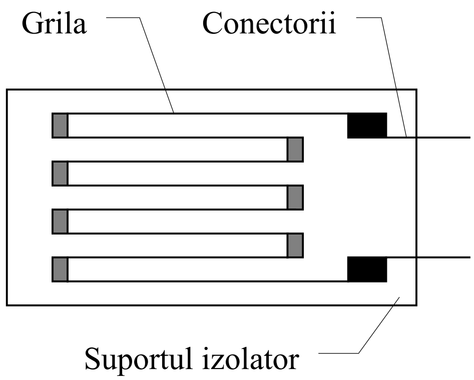
Prelucrarea datelor experimentale este foarte simplă, întrucât este de calculat doar rezistenţa la forfecare longitudinală a lemnului, folosind relaţia de mai sus. Mult mai interesant este să se reţină particularităţile lemnului, ca material natural neomogen şi anizotrop, ca şi elementele semnalate anterior cu privire la modul cum se realizează solicitarea de forfecare şi cum se produce ruperea lemnului sub acţiunea acestui tip de încărcare mecanică.

## MĂSURAREA CU TRADUCTOARE ELECTRICE REZISTIVE A TENSIUNILOR DIN PIESELE SOLICITATE MECANIC
### Verificarea preciziei măsurărilor

**Prezentare generală**

În ingineria mecanică este important să poată fi verificată experimental intensitatea solicitărilor din diverse piese, exprimată prin valorile tensiunilor din anumite puncte ale acestora. Măsurarea tensiunilor (tensometria) foloseşte metode diverse de lucru: cele bazate pe analizele unor variaţii ale parametrilor curentului electric utilizează ca elemente intermediare nişte traductoare, ataşate piesei în punctele de măsurare, cele mai răspândite fiind traductoarele electrice rezistive (TER).

Numite şi mărci tensometrice (întrucât se lipesc pe piese, ca timbrele pe plicuri), acestea au ca element de bază un fir metalic, foarte subţire, aşezat într-un fel de spirală (pentru a avea lungime relativ mare pe o suprafaţă mică) – formând grila traductorului – pe un suport izolator.



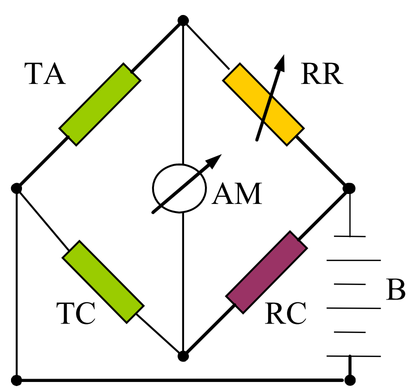

Schema de principiu a unui traductor electric rezistiv

Dimensiunile globale ale traductoarelor sunt de obicei mici, de ordinul milimetrilor, pentru ca suprafaţa de pe piesă pe care se citesc deformaţiile să fie cât mai mică. Lipirea mărcilor în punctele de măsurare se face folosind adezivi special destinaţi acestor aplicaţii, iar când piesa studiată se deformează sub acţiunea încărcărilor pe care le suportă, grilele traductoarelor se vor deforma solidar cu micile porţiuni de pe piesă pe care sunt lipite.

Se poate remarca pe schema alăturată că firul metalic este mai gros în porţiunile de legătură dintre zonele sale principale, aşezate în lungul grilei, pentru ca deformaţiile care se produc pe direcţia transversală, să influenţeze cât mai puţin rezultatele măsurărilor.

Modificările de dimensiuni ale firului metalic îi vor modifica rezistenţa electrică, iar intensitatea unui curent care îl străbate va avea variaţii care pot fi citite la un aparat de măsură. De fapt, semnalul electric citit va fi proporţional cu variaţiile alungirilor specifice „ε”, produse în punctul de măsurare ca urmare a solicitării aplicate.

O problemă importantă este acurateţea măsurărilor electrice, deoarece (mai ales în cazul pieselor metalice) deformaţiile specifice sunt foarte mici şi tot la fel vor fi şi variaţiile de curent ce se vor înregistra. Este necesar să se folosească circuite de măsurare foarte sensibile, iar în mod curent acestea sunt montaje de tip punte Wheatstone, al căror principiu de funcţionare este arătat în schiţa alăturată.




Schema montajului în punte Wheatstone

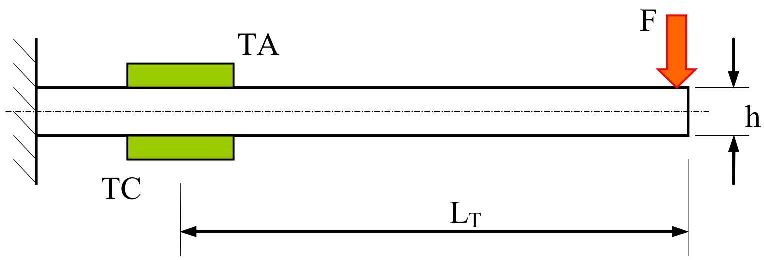
Circuitul de tip patrulater este alimentat, în curent continuu (de la bateria sau redresorul B) pe o diagonală, în vreme ce semnalul rezultant este cules de pe cealaltă diagonală, cu aparatul de măsură AM. Rezistenţele de pe ramura din dreapta sunt: una calibrată (RC) şi una reglabilă (RR), iar pe ramura din stânga sunt montate două traductoare tensometrice – unul activ (TA), lipit în zona de măsurare de pe piesă, celălalt de compensare (TC), un traductor „martor”, identic cu TA şi lipit pe un eşantion de material la fel cu al piesei cercetate, plasat în aceleaşi condiţii de mediu cu aceasta, dar lipsit complet de încărcări mecanice.

Montajul permite, dacă rezistenţele sunt alese corect, aducerea la zero a aparatului de măsură prin intermediul reglării rezistenţei RR, după care orice variaţie de rezistenţă din braţele circuitului va fi indicată de AM. Trebuie precizat că modificările de rezistenţă din braţe alăturate ale punţii produc efecte care se scad la aparatul de măsură, în vreme ce variaţiile din braţe opuse dau

efecte care se cumulează la AM. Pe acest fenomen se bazează metoda de „compensare termică” a traductoarelor tensometrice rezistive, care foloseşte traductorul TC de pe schema de mai sus: ambele traductoare suportă aceleaşi condiţii de mediu, deci vor avea aceleaşi variaţii de rezistenţă datorită eventualelor modificări ale acestora. În schimb, solicitările mecanice produc efecte doar asupra traductorului activ TA şi cum variaţiile de rezistenţă pentru TA şi TC se vor scădea, rezultă că efectele parazite ale condiţiilor de mediu vor fi eliminate din semnalul rezultant: acesta va indica doar variaţiile de rezistenţă din TA produse de solicitarea mecanică aplicată piesei.

**Scopul lucrării**

Lucrarea de faţă are ca obiectiv să se evalueze nivelul de precizie a măsurărilor efectuate cu traductoarele tensometrice rezistive. Evaluarea se bazează pe compararea unor date experimentale cu valorile calculate ale unei aceleiaşi mărimi – tensiunea de încovoiere dintr-un anumit punct al unei grinzi în consolă (încastrată la un capăt şi liberă la celălalt) care susţine pe capăt o forţă concentrată verticală.




**Schema de solicitare**

Se foloseşte o grindă de lăţime care creşte, dinspre capătul liber spre reazem, proporţional cu momentul de încovoiere care solicită bara: se observă că acest efort va fi cu atât mai mare cu cât secţiunea de calcul este mai distanţată faţă de punctul în care se aplică forţa F. Lăţimea piesei variază astfel încât valorile tensiunilor din fibrele ei extreme să fie aceleaşi în toate secţiunile transversale, iar barele de acest fel sunt numite „grinzi de egală rezistenţă” la încovoiere.

Pe schemă se observă că se folosesc traductoare TA şi TC, amplasate pe feţele opuse ale aceleiaşi secţiuni a barei, care se află la distanţa $L_T$ de punctul unde se aplică forţa F. Este un caz particular al metodei de compensare, cu ambele traductoare aflate sub acţiunea solicitării mecanice: având în vedere condiţiile descrise, rezultă că tensiunile de încovoiere din cele două puncte de măsurare vor avea valori egale, dar cu semne opuse (TA fiind solicitat la întindere).

**Relaţii de calcul**

Din cele de mai sus rezultă că semnalul produs la aparatul de măsură (gradat direct în unităţi de alungiri specifice ε) de variaţiile de rezistenţă din traductorul activ va avea două componente – una proporţională cu tensiunea (deci şi cu deformaţia specifică) maximă de încovoiere din secţiunea respectivă, iar cealaltă cu efectele parazite produse de variaţiile condiţiilor de mediu din laborator:

$$\varepsilon_{TA} = \varepsilon_{max}^{inc}(L_T) + \varepsilon^{termic}$$

În mod similar, semnalul furnizat de traductorul de compensare va cuprinde în aceeaşi măsură efectele parazite ale mediului, iar componenta dată de solicitarea mecanică va fi egală şi de sens opus celei din TA, adică:

$$\varepsilon_{TC} = -\varepsilon_{max}^{inc}(L_T) + \varepsilon^{termic}$$

Cele două traductoare fiind montate în braţe adiacente ale punţii Wheatstone, înseamnă că semnalul rezultant indicatde aparatul de măsură se calculează astfel:

$$\varepsilon_{rez}^{exp} = \varepsilon_{TA} - \varepsilon_{TC} = 2 \cdot \varepsilon_{max}^{inc}(L_T)$$

Prin urmare, circumstanţele speciale în care se face compensarea termică în acest caz conduc, pe lângă eliminarea efectelor condiţiilor de mediu, la amplificarea (dublarea) semnalului util care trebuie măsurat în experiment, cu efecte favorabile asupra sensibilităţii măsurărilor efectuate.

Pe de altă parte, se propune ca valoarea citită la aparat a semnalului rezultant de mai sus să fie comparată cu o valoare estimată prin calcule a acelui semnal. Practic este necesar să se calculeze, folosind relaţiile din rezistenţa materialelor, deformaţia specifică produsă de solicitarea

descrisă, în fibra superioară din secţiunea aflată la distanţa $L_T$ de punctul în care se aplică forţa F. Se porneşte de la valoarea tensiunii de încovoiere din acel punct şi de la expresia legii lui Hooke pentru această deformare elastică a barei considerate:

$$\varepsilon_{rez}^{calc} = 2 \cdot \varepsilon^{inc}(L_T) = 2 \cdot \frac{\sigma^{inc}(L_T)}{E} = \frac{2}{E} \cdot \frac{M_{iz}(L_T)}{W_z(L_T)}$$

În această relaţie apar modulul de elasticitate E al materialului grinzii, momentul de încovoiere din secţiunea de măsurare (calculat ca în fizica elementară, ca moment al lui F faţă de secţiune), ca şi modulul de rezistenţă $W_z$ al secţiunii de lucru. S-a precizat anterior că lăţimea grinzii este variabilă, deci se va nota cu $b(L_T)$ cea din secţiunea în care sunt lipite traductoarele, astfel că se obţine:

$$\varepsilon_{rez}^{calc} = \frac{2}{E} \cdot \frac{F \cdot L_T}{\frac{b(L_T) \cdot h^2}{6}} = \frac{12 \cdot F \cdot L_T}{E \cdot b(L_T) \cdot h^2}$$

Se mai precizează că forţa de încovoiere F se obţine prin atârnarea unei mase marcate „m” la capătul liber al grinzii, deci $F = m \cdot g$, unde „g” este acceleraţia gravitaţională.

**Modul de lucru**

Efectuarea lucrării presupune parcurgerea următoarelor etape:

- se porneşte puntea electronică şi se echilibrează la zero canalul de măsurare ales pentru conectarea traductoarelor TA şi TC la punte;
- se calculează valoarea estimată a semnalului rezultant $\varepsilon_{rez}$, folosind următoarele valori numerice ale mărimilor din relaţia de mai sus – m=4,025kg; g=9,81m/s$^2$; E=21·10$^4$MPa; $L_T$=207mm; h=5,25mm; $b(L_T)$=48mm; rezultatul se va exprima sub forma unui număr întreg înmulţit cu $10^{-6}$, fără dimensiuni (număr abstract);
- se aşează masa marcată pe capătul barei de egală rezistenţă care reprezintă proba solicitată la încovoiere, se reglează scara de citire a valorii ε, astfel ca citirea să se poată face corect, după care se notează valoarea experimentală $\varepsilon_{rez}$;
- se compară cele două valori ale semnalului rezultant şi se calculează precizia relativă a măsurărilor, sub forma abaterii faţă de valoarea calculată, folosind o relaţie de forma

$$\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon_{rez}^{calc} - \varepsilon_{rez}^{exp}}{\varepsilon_{rez}^{calc}} \cdot 100 \qquad [\%]$$

În legătură cu unităţile în care se exprimă alungirile specifice ε, ele ar trebui să fie raportul între două categorii de unităţi de lungime – alungirea împărţită la dimensiunea iniţială; piesele folosite în mod curent în ingineria mecanică, mai ales dacă sunt din metale, au în domeniul elastic al deformabilităţii lor alungiri foarte mici, de ordinul milimetrilor sau al subdiviziunilor acestora, iar pentru forţe care nu sunt foarte mari se preferă scrierea unităţilor de ε astfel:

$$\langle\varepsilon\rangle = \frac{\mu m}{m} = \frac{10^{-6} m}{m} = 10^{-6}$$

Prin urmare, alungirile specifice se măsoară de obicei în „µm/m” (aşa cum apare pe cadranul punţii electronice cu care se lucrează în acest experiment), ceea ce poate fi scris şi ca „$10^{-6}$ ” fără dimensiuni (aşa cum se prezintă rezultatul calculelor teoretice pentru valoarea $\varepsilon_{rez}$).

**Analiza rezultatelor**

Prezenta lucrare de laborator are ca obiectiv să informeze pe studenţi asupra existenţei metodelor experimentale de stabilire a tensiunilor din piesele solicitate mecanic, ca şi a potenţialului uriaş al acestor metode în privinţa verificării practice a rezultatelor proiectării inginereşti; este de reţinut că tensometria electrică rezistivă se bazează în prezent pe o gamă foarte extinsă de traductoare şi rozete de traductoare tensometrice, astfel că este aplicată pe scară largă în cele mai variate domenii inginereşti; este remarcabil că ea poate furniza soluţii pentru tot felul de probleme practice în care este necesară măsurarea unor mărimi mecanice dintre cele mai diverse.

# ÎNCERCAREA LA TRACŢIUNE A MATERIALELOR METALICE

**Prezentare generală**

Încercarea la tracţiune (sau întindere) este una dintre metodele cele mai sigure şi cel mai mult folosite pentru stabilirea modului principial în care se comportă un material necunoscut, atunci când este solicitat mecanic. Avantajele ei sunt următoarele:

- simplitatea relativă de punere în practică a încercării;
- relaţiile de calcul simple prin care sunt valorificate datele obţinute prin experimente;
- valabilitatea inclusiv în domeniul deformărilor plastice a relaţiilor de calcul folosite în domeniul elastic;
- costul redus de realizare, deoarece nu este necesară o calificare foarte înaltă a operatorului;
- cheltuielile materiale scăzute, fiind consumată o cantitate relativ mică de material studiat.

Trebuie făcută totuşi observaţia că rezultatele încercării nu sunt independente de calitatea dotărilor din laboratorul unde se lucrează: vor fi cu atât mai elocvente cu cât maşina folosită este mai competitivă şi mai complet utilată pentru efectuarea experimentelor.

**Scopul lucrării**

Prin realizarea încercării la tracţiune se pot atinge simultan mai multe obiective:

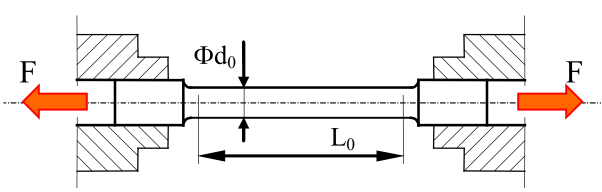
- stabilirea categoriei în care poate fi încadrat materialul studiat, din punctul de vedere al răspunsului la solicitările mecanice;
- determinarea valorilor caracteristicilor de rezistenţă şi de ductilitate, la tracţiune, ale materialului încercat;
- trasarea curbei caracteristice la tracţiune a materialului.

**Epruveta utilizată**

Pentru materialele metalice încercarea se efectuează urmând prevederile standardului SR EN 10002, care este pe cale să fie înlocuit de norma ISO 6892:2010. Ambele prevăd utilizarea unor epruvete de formă plată sau cilindrică, acestea din urmă fiind preferate dacă probele sunt prelevate din material sub formă de bloc. Pentru ca efectele forţelor cu care epruveta este prinsă în bacurile maşinii să nu denatureze starea de tensiuni din zona ei de măsurare, capetele epruvetei sunt de obicei ceva mai late şi mai groase faţă de celelalte porţiuni ale ei.

**Schema de solicitare**

Epruveta este solicitată la întindere prin intermediul a două forţe concentrate F, egale şi opuse, aplicate pe capetele ei şi având direcţia axei sale longitudinale. Forţele cresc treptat şi lent (solicitarea este de tip static) până la ruperea probei, iar pe parcursul încercării se înregistrează curba de variaţie a dependenţei dintre mărimea încărcării şi alungirea pe care aceasta o produce pe probă. Dimensiunile iniţiale $d_0$ şi $L_0$ se măsoară pe zona „calibrată” a epruvetei, aşa cum se arată în figura de mai jos.




Schema de principiu a încercării la tracţiune.

**Dispozitivul folosit**

Lucrarea se efectuează pe o maşină universală pentru încercări mecanice, condusă de computer, prin intermediul căruia se aleg parametrii la care se realizează solicitarea – de exemplu viteza de creştere a forţei. Aceasta se reglează de fapt în termeni de alungire (îndepărtarea reciprocă a capetelor epruvetei) produsă în unitatea de timp.

Maşina afişează în mod continuu pe monitor graficul de dependenţă între forţa aplicată F şi alungirea $\Delta L$ a epruvetei, grafic pentru care se poate opta să aibă în axele de coordonate şi alte mărimi (de exemplu tensiune-alungire specifică), ale căror valori se calculează automat pe baza datelor iniţiale ale probei.

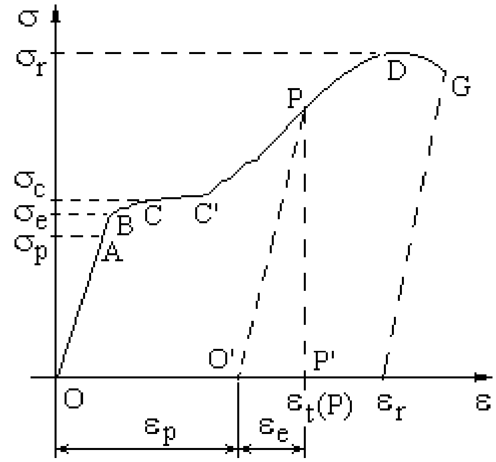
**Tipuri de comportări ale materialelor**

Imaginea grafică a dependenţei dintre mărimile relative σ şi ε este specifică fiecărei clase de materiale, fiind numită *curbă caracteristică a materialului* (în acest caz – la tracţiune). Ea oferă multe informaţii privind proprietăţile materialului respectiv, aşa cum se va arăta mai jos.

Pentru oţelurile de duritate medie, pe curba caracteristică se pot deosebi mai multe zone, cărora le corespund o serie de mărimi importante.

Punctul O corespunde situaţiei iniţiale, în care în epruvetă nu există tensiuni (σ=0) şi nici deformaţii (ε=0); în prima porţiune a curbei, cele două mărimi cresc simultan, dar viteza de creştere a lui (σ) este mai mare (graficul este mai apropiat de axa tensiunilor). În plus, dependenţa dintre cele două mărimi este liniară până în punctul A, care corespunde *limitei de proporţionalitate* a materialului ($\sigma_p$).

Ordonata punctului B, până la care materialul se comportă perfect elastic, adică după descărcare (îndepărtarea forţei) epruveta îşi recapătă lungimea iniţială $L_0$, se numeşte *limită de elasticitate* ($\sigma_e$).



Aspectul tipic al curbei caracteristice pentru oţelurile de duritate medie.

Începând din punctul C curba capătă tendinţa de a continua pe o direcţie aproximativ paralelă cu axa absciselor, deoarece se produce creşterea deformaţiei fără ca forţa să crească în mod sensibil (se spune că materialul "curge"). Această zonă marchează intrarea în zona deformării plastice a materialului, iar tensiunea corespunzătoare punctului C se numeşte *limită de curgere* ($\sigma_c$).

Urmează o porţiune crescătoare a curbei, fără proporţionalitate între cele două mărimi, care se termină în punctul de maxim D, considerat a fi *limita de rupere* ($\sigma_r$) sau **rezistenţa la** (rupere prin) **tracţiune** a materialului testat. Dacă se opreşte încercarea într-un punct oarecare $P \in (C'D)$ şi se urmăreşte evoluţia epruvetei pe parcursul scăderii forţei către zero, se constată că descreşterea celor două mărimi nu se face nici pe drumul urmat la încărcare şi nici pe direcţia normală la axa absciselor (PP'), ci după o linie (PO'), aproximativ paralelă cu zona elastică (OB) a curbei.

Aceasta arată că deformaţiile înregistrate pe epruvetă nu sunt în totalitate reversibile, pentru că din deformaţia specifică ($\varepsilon_t$), existentă în starea de încărcare din punctul P, dispare cantitatea ($\varepsilon_e$), numită *deformaţie elastică*, dar epruveta rămâne cu deformaţia ($\varepsilon_p$) – *deformaţie plastică* (permanentă), adică are o lungime mai mare cu ($\varepsilon_p \cdot L_0$) decât lungimea iniţială.

Dacă această epruvetă se montează din nou în maşina pentru încercări şi se reia solicitarea ei, se observă o evoluţie σ(ε) mergând, cu aproximaţie, după segmentul (O'P), ceea ce indică o zonă cu deformare proporţională (elastică) a materialului, zonă de lungime mai mare decât porţiunea iniţială (OA). Acest fenomen, marcând o modificare favorabilă a calităţilor materialului, se numeşte *ecruisare* şi este specific metalelor cu proprietăţi mecanice moderate. Este recomandabil ca piesele făcute din astfel de materiale să fie supuse unei solicitări iniţiale (pre-încărcare) înainte de a le fi aplicate încărcările propriu-zise pe care trebuie să le preia.

Când se ajunge cu încărcarea epruvetei în apropierea punctului D, adică la valoarea maximă a forţei ($F_{max}$), se constată că într-o anumită porţiune a epruvetei secţiunea ei transversală se micşorează ("gâtuire"), fenomen care se accentuează apoi până când se produce ruperea. În acest timp forţa aplicată se micşorează, conducând la un traseu descendent (DF) al curbei caracteristice.

Este remarcabil că momentul apariţiei gâtuirii pe epruvetă înseamnă pierderea caracterului omogen al solicitării (care fusese observabil prin producerea aceloraşi fenomene în întregul volum al probei aflat în afara zonelor de prindere), datorită creşterii valorilor locale ale tensiunilor şi deformaţiilor specifice în acea zonă a epruvetei.

Pe lângă forma propriu-zisă a curbei caracteristice, aspectul secţiunii de rupere a epruvetei este un criteriu în plus pentru încadrarea materialului analizat într-o anumită categorie: materialele **fragile** se rup după deformaţii foarte mici, aproape inobservabile, iar cele **ductile** – dimpotrivă, se deformează mult, iar curba nu are o zonă urcătoare după zona de curgere.

Materialele pentru care s-a descris mai sus forma tipică a curbei de tracţiune, în rândul cărora se situează şi oţelurile de duritate medie, formează categoria intermediară: ele nu manifestă nici fragilitate, dar nici ductilitate pronunţată, în schimb închid sub curba lor caracteristică la tracţiune o suprafaţă mult mai mare decât la celelalte două categorii. Această arie reprezintă măsura energiei de deformare pe care materialul o poate acumula înainte de rupere: cu cât aceasta este mai mare, cu atât materialul este mai **tenace** şi va suporta mai bine, de exemplu, solicitările prin şoc.

Aşadar, despre un material care se rupe la tracţiune prin smulgere, după apariţia unei gâtuiri pronunţate pe epruvetă şi pentru care pe curba caracteristică apar zonele descrise, inclusiv zona urcătoare dinainte de rupere, se va spune că are tenacitate mare şi că este recomandabil pentru preluarea în condiţii de siguranţă a unei game variate de încărcări mecanice.

**Relaţii de calcul**

Dacă după rupere se aşează cap la cap cele două bucăţi ale epruvetei şi se măsoară lungimea finală $L_u$ a porţiunii sale calibrate, se poate determina *alungirea specifică la rupere* a materialului:

$$A_r = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \qquad (1)$$

În mod analog, notând cu $S_0$ şi $S_u$ ariile iniţială şi finală (calculate în funcţie de diametru) ale secţiunii de rupere, se poate stabili *gâtuirea specifică la rupere* a materialului:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \qquad (2)$$

Cu privire la valorile limită ale tensiunii, în standardele pentru încercarea la tracţiune a metalelor se recomandă calcularea lor prin împărţirea valorilor corespunzătoare ale forţei de încărcare nu la aria instantanee a secţiunii epruvetei, ci la aria ei iniţială $S_0$, astfel că limitele teoretice ale tensiunii ($\sigma_c$ şi $\sigma_r$) sunt înlocuite prin nişte mărimi *convenţionale*:

- limita de curgere $$R_e = \frac{F_c}{S_0} \quad [\text{MPa}] \qquad (3)$$
- limita de rupere $$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \qquad (4)$$

Aceste patru mărimi ($R_e$, $R_m$, $A_r$, Z), calculate pe baza datelor obţinute din încercarea descrisă, se numesc *caracteristici mecanice la tracţiune* ale materialului analizat, iar cunoaşterea lor este importantă pentru calculele de rezistenţă şi pentru folosirea corectă a materialului în cauză.

**Modul de lucru**

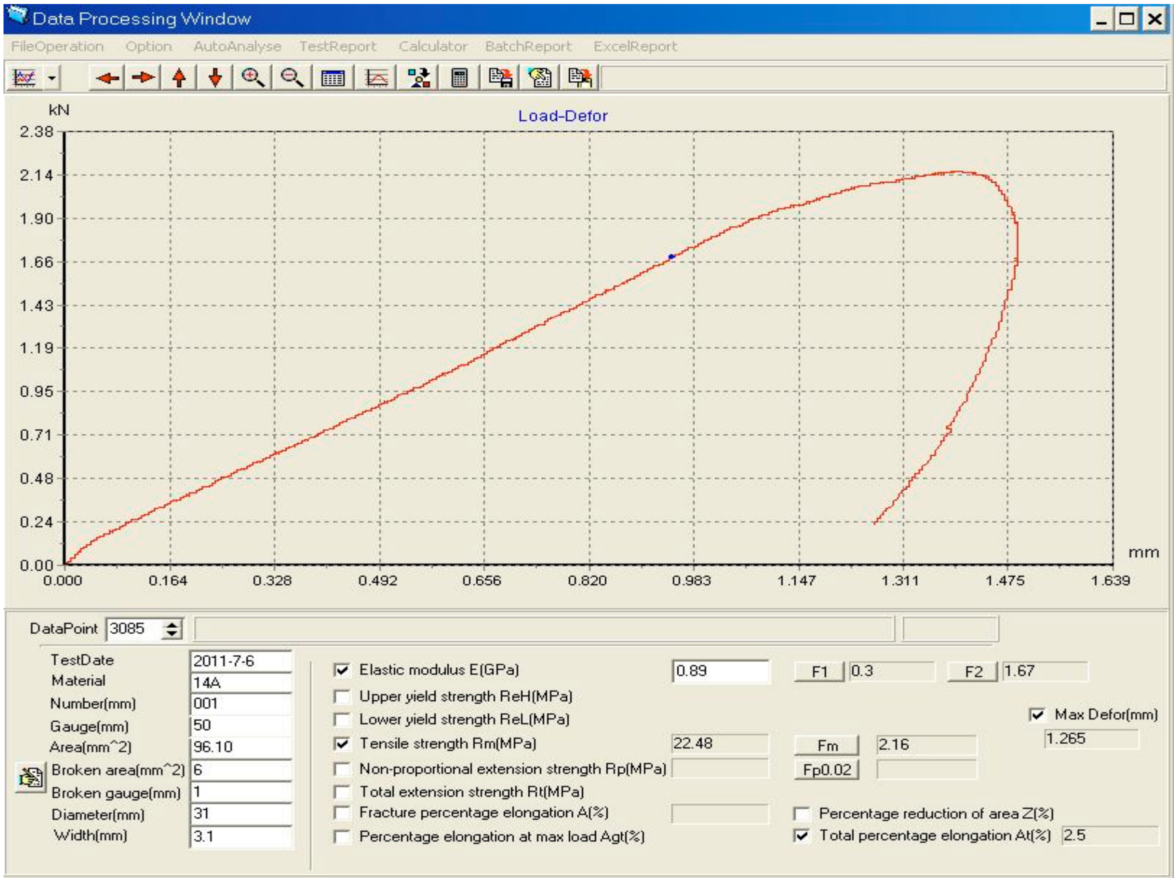
Efectuarea în laborator a încercării de tracţiune presupune parcurgerea următoarelor etape:

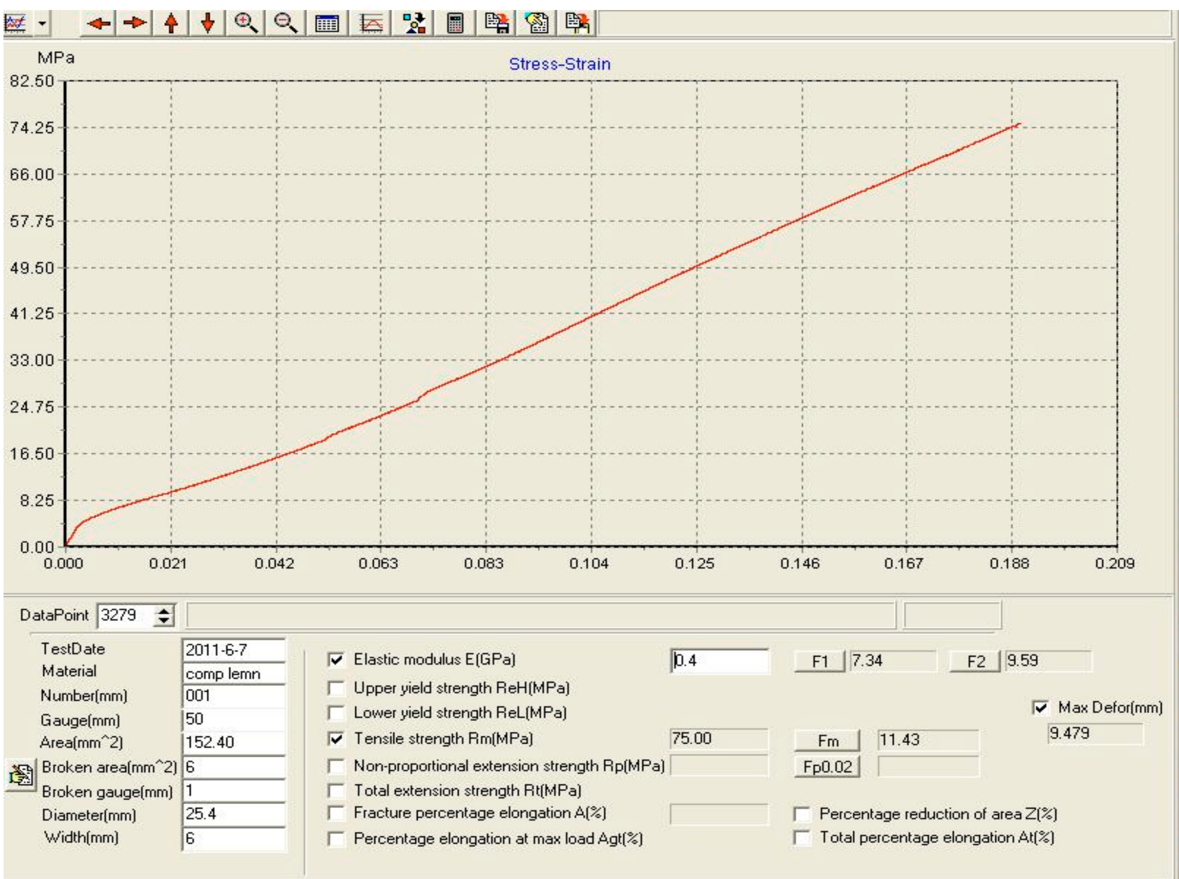
- se porneşte maşina şi se reglează parametrii încercării; viteza de creştere a solicitării se alege, de exmplu la valoarea de 2mm/min;
- se măsoară valorile iniţiale ale diametrului şi lungimii epruvetei;
- se completează cu aceste valori tabelul afişat pe monitor;
- se instalează epruveta între bacurile de prindere ale maşinii şi se porneşte încărcarea;
- se urmăreşte modul în care proba se deformează pe parcursul solicitării, iar pe monitor se observă trasarea curbei caracteristice a epruvetei;
- după producerea ruperii probei se înregistrează curba în computerul maşinii, apoi se scot bucăţile de epruvetă din maşină şi se măsoară dimensiunile finale - diametrul $d_u$ din secţiunea de rupere şi distanţa $L_u$ dintre reperele extreme de pe epruvetă, atunci când bucăţile rupte sunt aşezate cap la cap pentru reconstituirea probei.

**Analiza rezultatelor**

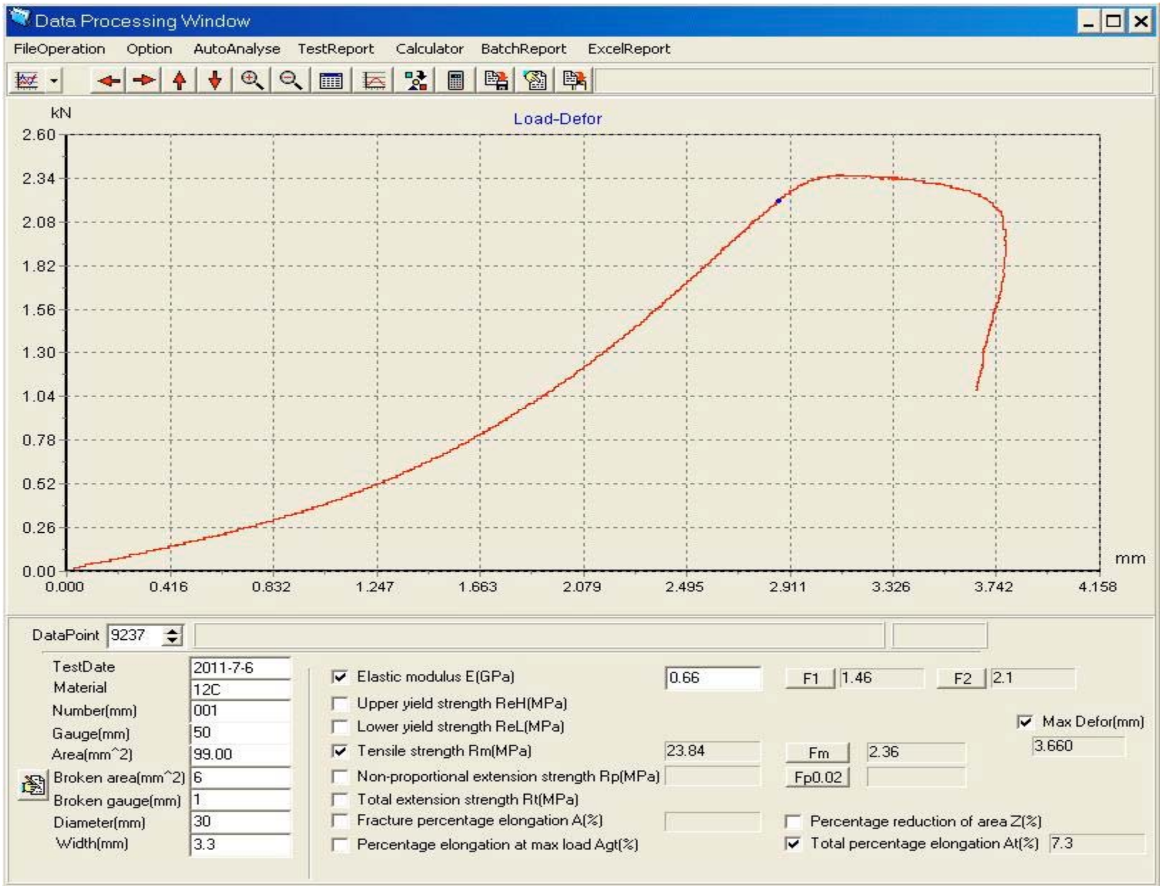
Fenomenele observate şi datele rezultate din experiment permit să se încadreze materialul încercat într-o anumită categorie de materiale, precum şi să se calculeze valorile caracteristicilor sale de rezistenţă (limitele de curgere şi de rupere) şi ductilitate (alungirea şi gâtuirea la rupere).

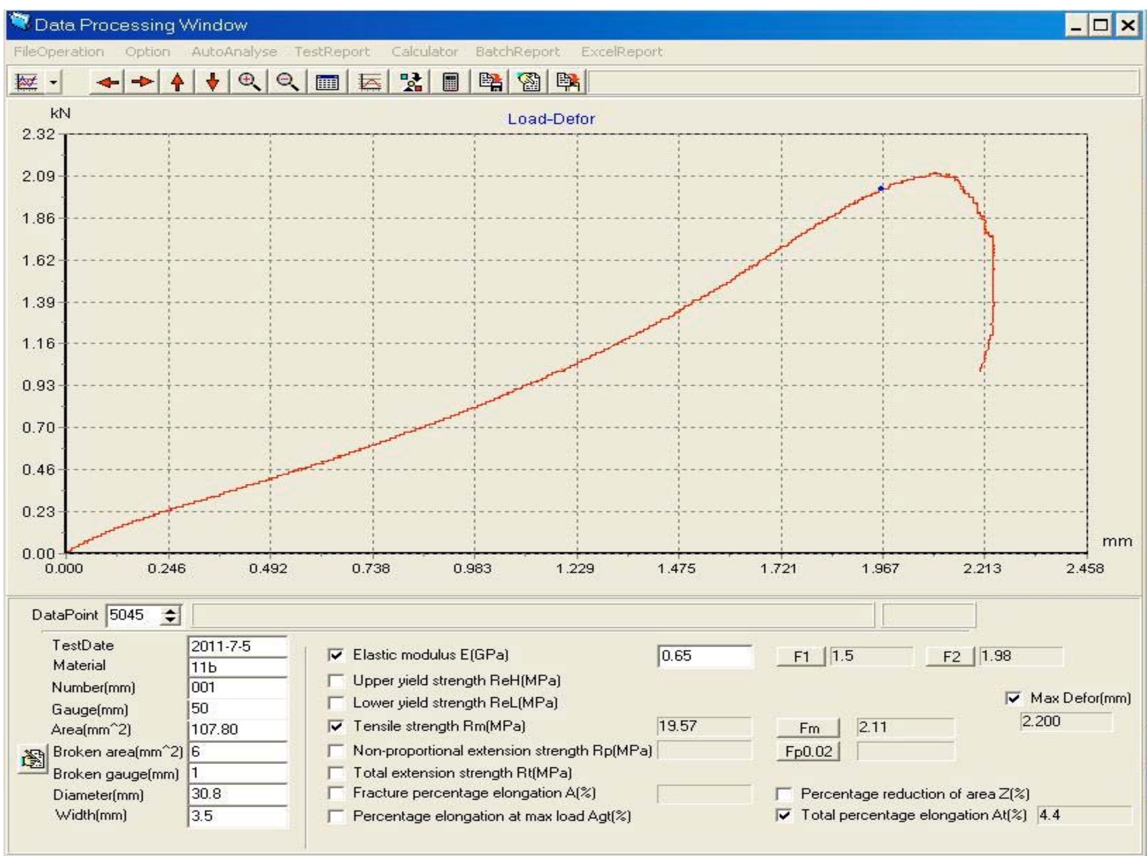
## Câteva forme tipice de curbe caracteristice



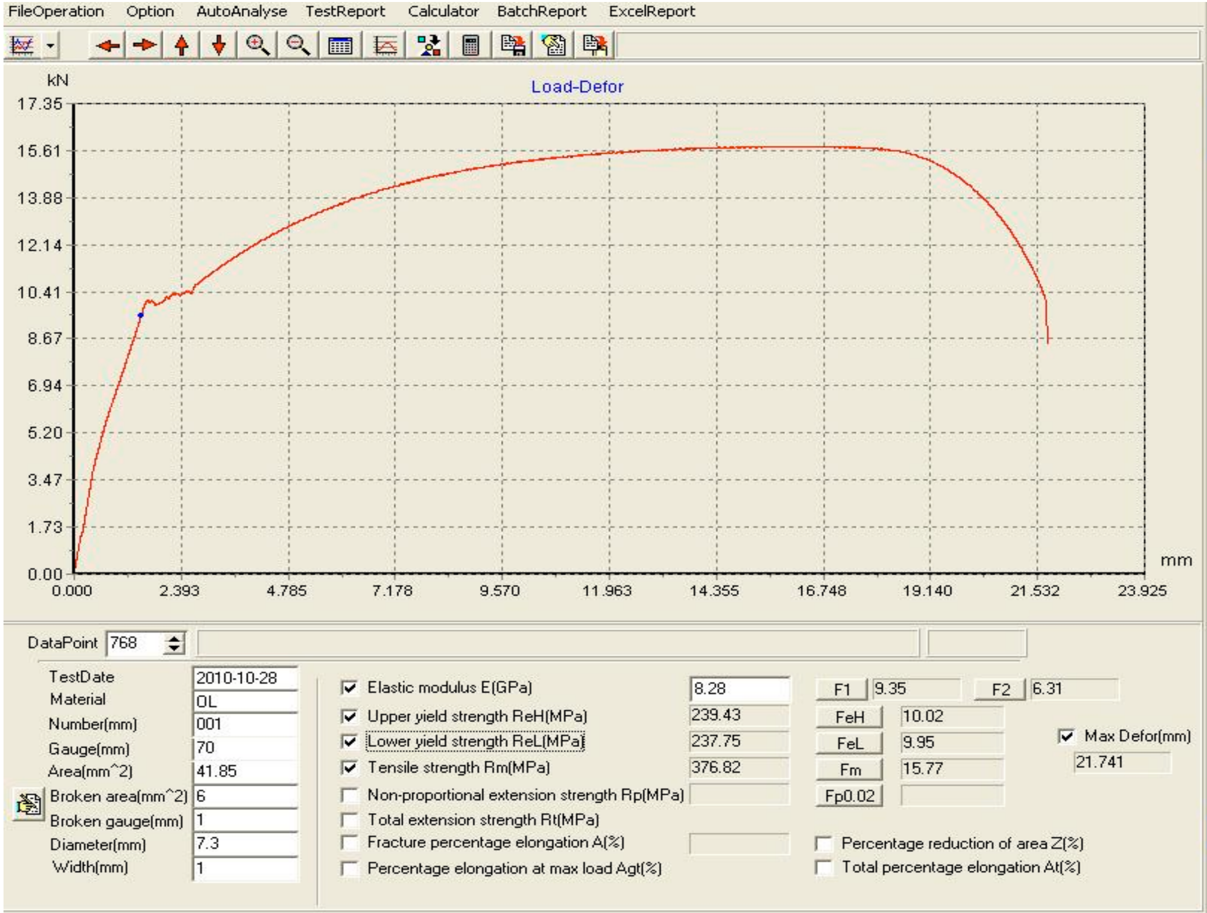



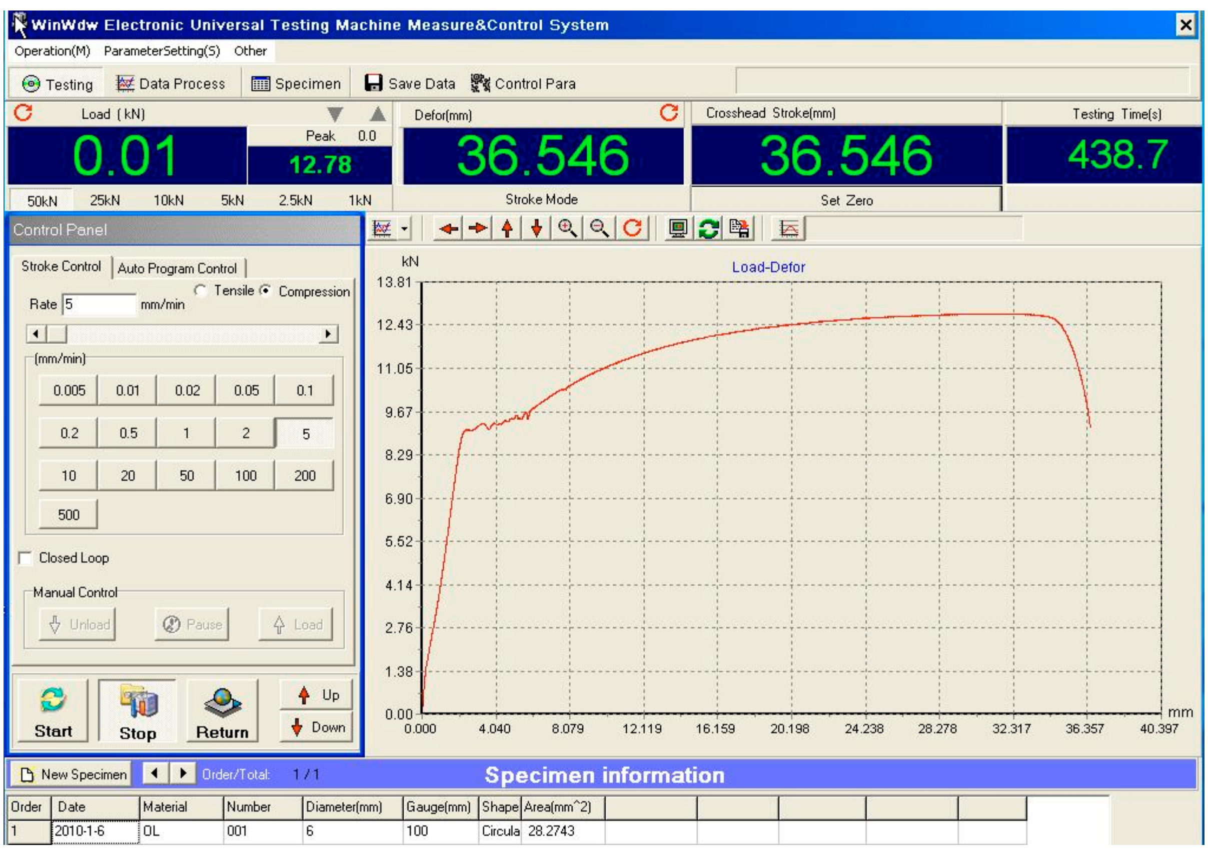

Materiale compozite preponderent fragile




Materiale compozite cu matrice polimerică şi armare cu ţesături de fibre de tip textil




Oţel tenace, în două variante de prezentare a rezultatelor încercării